

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Электрофизические особенности запыленной плазмы высокочастотного факельного разряда

УДК 533.93:537.5:543.552

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Попов Александр Викторович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОЯТЦ ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерная физика и технологии	Бычков П.Н.	к.т.н.		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:

Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.) Бычков П.Н.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Попов Александр Викторович

Тема работы:

Электрофизические особенности запыленной плазмы высокочастотного факельного разряда	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№957/с от 16.02.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы	28.05.2019 г.
---	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Определить изменение характеристик плазмы высокочастотного факельного разряда при запылении веществами с различным потенциалом ионизации.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Провести измерения ВАХ ВЧФР при его запылении веществами с различными потенциалами ионизации; 2. Провести измерения электромагнитного поля запыленного ВЧФР; 3. Провести расчет волнового числа электромагнитной волны запыленного ВЧФР.
Перечень графического материала	Презентация

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Гоголева Т.С.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском языке:	
1 Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда	
2 Особенности процесса горения высокочастотного факельного разряда в средах с дисперсной фазой	
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
4 Социальная ответственность	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.04.2018
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м. н.		20.04.2018

Задание принял к исполнению студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Попов А.В.		20.04.2018

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0A5Д	Попов Александр Викторович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерная физика и технологии

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Принять по действующим ценам
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	–
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Ставка НДС – 20%; Ставка социального налога – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	– Расчет продолжительности этапов работ; – Построение линейного графика работ; – Расчет накопления готовности проекта.
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Выполнить
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Выполнить

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

Линейный график работ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	22.04.2019
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОГСН ШИП	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		22.04.2019

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A5Д	Попов А.В.		22.04.2019

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А5Д	Попов Александр Викторович

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	ОЯТЦ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения); – опасных проявлений факторов производственной среды (термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы);
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме	<ul style="list-style-type: none"> – требования охраны труда при работе на ПЭВМ и ВЧ факельном разряде; – электробезопасность; – пожаровзрывобезопасность;

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности	<ul style="list-style-type: none"> – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИЯТШ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А5Д	Попов А.В.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Уровень образования Бакалавриат
 Направление подготовки 14.03.02 Ядерная физика и технологии
 Отделение школы (НОЦ) Ядерно-топливного цикла
 Период выполнения (Осенний / весенний семестр 2018 / 2019 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	28.05.2019 г.
--	---------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
15.05.2019	1 Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда	
20.05.2019	2 Особенности процесса горения высокочастотного факельного разряда в средах с дисперсной фазой	
27.05.2019	3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	
15.05.2019	4 Социальная ответственность	

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОЯТЦ ИЯТШ	Луценко Ю.Ю.	д.ф.-м.н..		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ядерные физика и технологии	Бычков П.Н.	К.Т.Н.		

Код результата	Результат обучения (компетенции)
Общекультурные компетенции	
P1	Демонстрировать культуру мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения; стремления к саморазвитию, повышению своей квалификации и мастерства; владение основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, навыки работы с компьютером как средством управления информацией; способность работы с информацией в глобальных компьютерных сетях.
P2	Способность логически верно, аргументировано и ясно строить устную и письменную речь; критически оценивать свои достоинства и недостатки, намечать пути и выбирать средства развития достоинств и устранения недостатков.
P3	Готовностью к кооперации с коллегами, работе в коллективе; к организации работы малых коллективов исполнителей, планированию работы персонала и фондов оплаты труда; генерировать организационно-управленческих решения в нестандартных ситуациях и нести за них ответственность; к разработке оперативных планов работы первичных производственных подразделений; осуществлению и анализу исследовательской и технологической деятельности как объекта управления, осознавать социальную значимость своей будущей профессии, обладать высокой мотивацией к выполнению профессиональной деятельности
P4	Умение использовать нормативные правовые документы в своей деятельности; использовать основные положения и методы социальных, гуманитарных и экономических наук при решении социальных и профессиональных задач, анализировать социально-значимые проблемы и процессы.
P5	Владеть одним из иностранных языков на уровне не ниже разговорного.
P6	Владеть средствами самостоятельного, методически правильного использования методов физического воспитания и укрепления здоровья, готов к достижению должного уровня физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности.
Общепрофессиональные	
P7	Использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.
Профессиональные компетенции	
P8	Владеть основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий; И быть готовым к оценке ядерной и радиационной безопасности, к оценке воздействия на окружающую среду, к контролю за соблюдением экологической безопасности, техники безопасности, норм и правил производственной санитарии, пожарной, радиационной и ядерной безопасности, норм охраны труда; к контролю соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям, требованиям безопасности и другим нормативным документам; за соблюдением технологической дисциплины и обслуживанию технологического оборудования ; и к организации защиты объектов интеллектуальной собственности и результатов исследований и разработок

	как коммерческой тайны предприятия; и понимать сущность и значение информации в развитии современного информационного общества, сознавать опасности и угрозы, возникающие в этом процессе, соблюдать основные требования информационной безопасности, в том числе защиты государственной тайны).
P9	Уметь производить расчет и проектирование деталей и узлов приборов и установок в соответствии с техническим заданием с использованием стандартных средств автоматизации проектирования; разрабатывать проектную и рабочую техническую документацию, оформление законченных проектно-конструкторских работ; проводить предварительного технико-экономического обоснования проектных расчетов установок и приборов.
P10	Готовность к эксплуатации современного физического оборудования и приборов, к освоению технологических процессов в ходе подготовки производства новых материалов, приборов, установок и систем; к наладке, настройке, регулировке и опытной проверке оборудования и программных средств; к монтажу, наладке, испытанию и сдаче в эксплуатацию опытных образцов приборов, установок, узлов, систем и деталей.
P11	Способность к организации метрологического обеспечения технологических процессов, к использованию типовых методов контроля качества выпускаемой продукции; и к оценке инновационного потенциала новой продукции.
P12	Способность использовать информационные технологии при разработке новых установок, материалов и приборов, к сбору и анализу информационных исходных данных для проектирования приборов и установок; технические средства для измерения основных параметров объектов исследования, к подготовке данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций; к составлению отчета по выполненному заданию, к участию во внедрении результатов исследований и разработок; и проведения математического моделирования процессов и объектов на базе стандартных пакетов автоматизированного проектирования и исследований.
P13	Уметь готовить исходные данные для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и базы данных в своей предметной области; и выполнять работы по стандартизации и подготовке к сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов.
P14	Готовность к проведению физических экспериментов по заданной методике, составлению описания проводимых исследований и анализу результатов; анализу затрат и результатов деятельности производственных подразделений; к разработке способов применения ядерно-энергетических, плазменных, лазерных, СВЧ и мощных импульсных установок, электронных, нейтронных и протонных пучков, методов экспериментальной физики в решении технических, технологических и медицинских проблем.
P15	Способность к приемке и освоению вводимого оборудования, составлению инструкций по эксплуатации оборудования и программ испытаний; к составлению технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование), а также установленной отчетности по утвержденным формам; и к организации рабочих мест, их техническому оснащению, размещению технологического оборудования.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 69 с., 21 рис., 6 табл., 28 источников, 0 приложений.

Ключевые слова: плазма, температура, высокочастотный факельный разряд, степень запыления.

Объектом исследования является запыленный высокочастотный факельный разряд.

Цель работы – определить изменение характеристик плазмы высокочастотного факельного разряда при запылении веществами с различным потенциалом ионизации.

В процессе исследования проводились:

- Изучение физики высокочастотного факельного разряда;
- Экономический расчет затрат на проведение выпускной квалификационной работы, составлен план-график работ;
- Выводы по работе. Заключение.

В результате исследований:

- Установлено увеличение тока, протекающего в разряде при его запылении веществами с потенциалом ионизации менее 7 эВ;
- Показано отсутствие изменения характеристик электромагнитного поля разряда при степенях его запыления $\nu < 10^{-2}$;
- Установлено уменьшение затухания электромагнитного поля ВЧФР при его запылении проводящим материалом.

Область применения: Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации установок по плазменной переработке веществ, а также установок для плазменного нанесения покрытий.

Перечень определений

Плазма – ионизированный газ, состоящий из свободных электронов, положительно и отрицательно заряженных ионов, нейтральных и возбужденных атомов или молекул.

Высокочастотный факельный разряд – вид одноэлектродного газового разряда, возникающий в присутствии высокочастотного электромагнитного поля.

Степень запыления плазмы разряда – определяется как отношение объема распыляемого вещества к общему объему разрядной камеры.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	13
1. ОБЗОРНАЯ ГЛАВА.....	15
1.1 Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда.....	15
1.2. Диагностика плазмы ВЧФР и ее специфика	24
2 Особенности процесса горения запыленного высокочастотного факельного разряда.	35
3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...	42
3.1 Организация и планирование работ	42
3.1.1 Продолжительность этапов работ	43
3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	45
3.2.2 Расчет заработной платы.....	45
3.2.3 Расчет затрат на социальный налог.....	46
3.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	47
3.2.5 Расчет амортизационных расходов	48
3.2.6 Расчет прочих расходов.....	49
3.2.7 Расчет общей себестоимости разработки	50
3.2.8 Расчет прибыли	50
3.2.9 Расчет НДС	50
3.2.10 Цена разработки НИР	50
3.3 Оценка экономической эффективности проекта	51
4. Социальная ответственность	52
4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	52
4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на персонал.	54
4.2.1 Организационные мероприятия.....	54
4.2.2 Организация рабочего места оператора ПК	54
4.2.3 Условия безопасной работы.....	57
4.3 Требования безопасности при работе с высокочастотным факельным плазмотроном	60
4.4 Электробезопасность	62
4.5 Пожарная и взрывная безопасность	64

Заключение	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	67

ВВЕДЕНИЕ

Обычно в плазменной технологии газовые разряды используют только как источник плазменной струи. Но переработка веществ непосредственно в газовом разряде имеет преимущества в сравнении с переработкой веществ в самой плазменной струе. В первую очередь, в газовом разряде температура плазмы выше и имеет меньший осевой градиент температуры. Электрические поля и более высокая концентрация электронов в разрядной зоне делают каталитические свойства плазмы более выраженными.

Высокочастотный факельный разряд предпочтительнее других факельных разрядов потому, что он является более устойчивым к запылению плазмы разряда, имеет возможность зажигаться практически в любых средах, а также обладает большим объемом разрядной плазмы, даже, при относительно небольшой величине мощности, подаваемой в разряд.

В данной выпускной квалификационной работе были проведены измерения электрофизических параметров высокочастотного факельного разряда, запыляемого диэлектрическими и проводящими материалами. Был использован высокочастотный факельный разряд с одним электродом. Разряд возбуждался в кварцевой трубке. Горение разряда осуществлялось в воздухе при атмосферном давлении. Порошок подавался в центральную зону разряда пневматическим питателем. Ток измерялся поясом Роговского.

Приведены результаты измерения и величины высокочастотного тока факельного разряда, горящего в воздухе в зависимости от потенциала ионизации запыляющих его веществ. Установлено увеличение высокочастотного тока разряда в случае, когда величина потенциала ионизации запыляющего вещества составляет менее 7 эВ. Проведены измерения осевого распределения напряжённости электрического поля, свободно горящего и запылённого факельного разряда. Показано, что при

запылении разряда проводящим материалом затухание электромагнитного поля вдоль оси разряда уменьшается.

Приведены результаты расчётов коэффициента затухания электромагнитной волны, распространяющейся в запылённой плазме высокочастотного факельного разряда. Установлено, что существенное затухание электромагнитного поля разряда наблюдается лишь при степенях его запыления превышающих величину 10^{-2} . Подобную величину запыления невозможно осуществить практически, вследствие чего процесс запыления разряда обычно не оказывает влияние на устойчивость его горения.

1. ОБЗОРНАЯ ГЛАВА

1.1 Свойства и особенности высокочастотного факельного разряда

Высокочастотный факельный разряд (ВЧФР) является одноэлектродным и представляет собой плазменный шнур (рис.1.1.1), горящий с поверхности электрода, к которому приложено высокочастотное напряжение. ВЧФР может быть возбужден с поверхности не только проводника, но и с поверхности диэлектрика.

ВЧФР был открыт Зилитинкевичем С.И. «в 1928 году при исследовании работы ВЧ генераторов» [1]. Отметим, что до 60-х годов проводились исследования одноэлектродных разрядов, с мощностью не более 200 Вт.

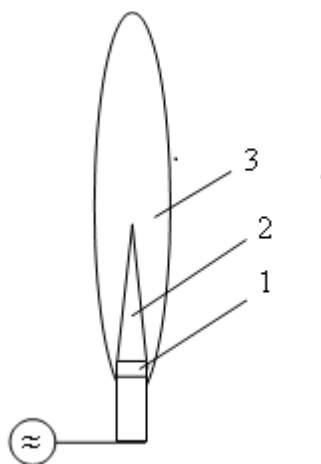


Рис. 1.1.1 Высокочастотный факельный разряд

1 – приэлектродный слой; 2 – канал; 3 – диффузионная оболочка

Наиболее глубокие, исследования одноэлектродного разряда мощностью до 150-200 Вт, возбуждаемого синусоидальным ВЧ напряжением были проведены чешским автором Trunecsek V. [2, 3].

При вышеприведенных величинах мощностей, вкладываемых в разряд, автор работ [2, 4] «выделил три режима его горения, для каждого из которых существует свой механизм протекания физических процессов:

высокочастотный коронный разряд; высокочастотный факельный разряд; высокочастотный дуговой разряд».

Высокочастотный коронный – «это самостоятельный газовый разряд, представляющий собой целый ряд искривленных плазменных каналов, выходящих из электрода в виде «короны», либо имеющий вид одного канала с размытой, диффузной структурой». «Высокочастотная корона наблюдается при частотах $\nu < 10$ МГц, а также в случае больших частот ВЧ-напряжения – при усиленном охлаждении плазмы разряда» [2]. «Для высокочастотной короны характерна высокая степень неравновесности и соответственно существенное различие между температурой электронов $T_e = (6 \div 7) \cdot 10^3$ К и температурой тяжелых частиц $T = (2 \div 3) \cdot 10^3$ К. Механизм горения высокочастотной короны объясняется на основе стримерной теории» [5, 6, 7, 8].

«Высокочастотный факельный разряд (рис. 1.1.1.) имеет три структурных элемента: приэлектродный слой 1, канал 2 и диффузионную оболочку 3. Электропитание разряда осуществляется от ВЧ генератора. Горение ВЧФР наблюдается в широком частотном диапазоне, начиная с частоты $\nu \sim 6$ МГц и выше. Механизм горения ВЧФР обусловлен процессами термической ионизации» [2].

«Высокочастотная дуга представляет собой одноэлектродный разряд при горении которого идет сильное испарение материала электрода. Вследствие этого при рассмотрении механизма горения высокочастотной дуги необходимо учитывать процессы на электроде, а также влияние присутствия газовой фазы материала электрода в плазме разряда. В случае охлаждения электрода высокочастотная дуга переходит в ВЧФР» [4].

Вышеперечисленные типы одноэлектродных высокочастотных разрядов хорошо различимы только при малых мощностях высокочастотной энергии, подводимой к разряду, так как в этом случае регулирование степени неравновесности плазмы разряда можно осуществить:

- изменением подводимой к разряду мощности,

- охлаждением плазмы разряда газовым потоком.

При мощностях $W > 70 \text{ Вт}$ в случае охлаждаемого электрода, в большинстве случаев можно наблюдать только ВЧФР. А значит, при работе с достаточно мощными разрядами, используемыми в прикладных и исследовательских целях, возбуждаемых при частоте $\nu > 10 \text{ МГц}$, одноэлектродный разряд можно отождествить с ВЧФР.

ВЧ факельный разряд с момента его открытия и до настоящего времени исследовался преимущественно в следующих направлениях:

1. «исследование влияния различных факторов (формы, материала электрода, рода плазмообразующего газа, величины подводимой мощности) на свойства ВЧФР» [2, 3, 7];
2. «исследование характеристик плазмы ВЧФР (температуры тяжелых частиц, температуры и концентрации электронов, степени неравновесности плазмы разряда)» [3, 4, 7, 9];
3. «теоретические и экспериментальные исследования вопросов тепломассопереноса в плазме ВЧФР» [9, 10, 11];
4. «исследование амплитудно-модулированной плазмы ВЧФР» [12];
5. «изучение влияния внешних электрических полей на свойства и поведение ВЧФР» [12];
6. «исследование вопроса согласования ВЧФР с ВЧ генератором» [6];
7. «исследование электрических характеристик ВЧФР (напряжение горения, полный ток, емкость разряд-земля)» [2, 13].

ВЧФР легко возбуждается практически в любой газовой среде (воздух, инертные газы, водород и т.д.) при давлениях $10 \div 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Вид, форма и режимы горения ВЧФР рассмотрены в работах [2, 4, 10].

Экспериментальные исследования показывают, что структура ВЧФР и его размеры определяются свойствами плазмообразующего газа, уровнем и характером подводимой к разряду мощности. При давлениях более $3,3 \cdot 10^4$ Па свободный ВЧФР представляет собой плазменное образование с ярко выделенным тонким каналом и диффузионной оболочкой с радиусом в $3 \div 10$ раз большем радиуса канала (рис. 1.1.1).

Результаты экспериментальных исследований ВЧФР, горящего при атмосферном давлении, его основные свойства и особенности представлены в таблице 1.1.1 и на рис. 1.1.2 и 1.1.3.

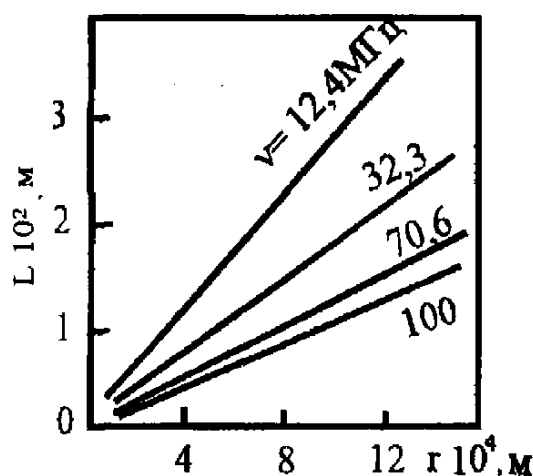


Рис. 1.1.2. Зависимость длины канала ВЧФР от радиуса разряда

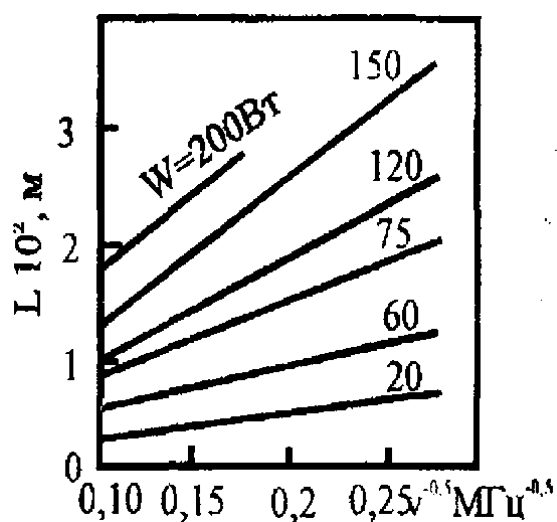


Рис. 1.1.3. Зависимость длины канала ВЧФР от частоты

Большое число трудов посвящено измерению температуры факельного разряда. В таблице 1.1.1 приведены значения температуры канала ВЧФР. Как видно из таблицы 1.1.1 газовая температура ВЧФР существенно зависит от

вида плазмообразующего газа и частоты электромагнитного поля, которое подается на разряд. Кроме того, газовая температура зависит также от мощности, подаваемой в разряд и от частоты (рис.1.1.4 и рис. 1.1.5) [14].

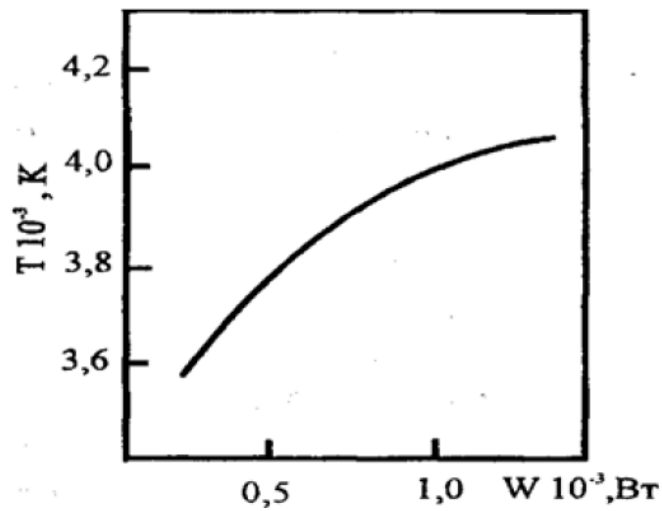


Рис. 1.1.4. Зависимость температуры в канале ВЧФР от мощности

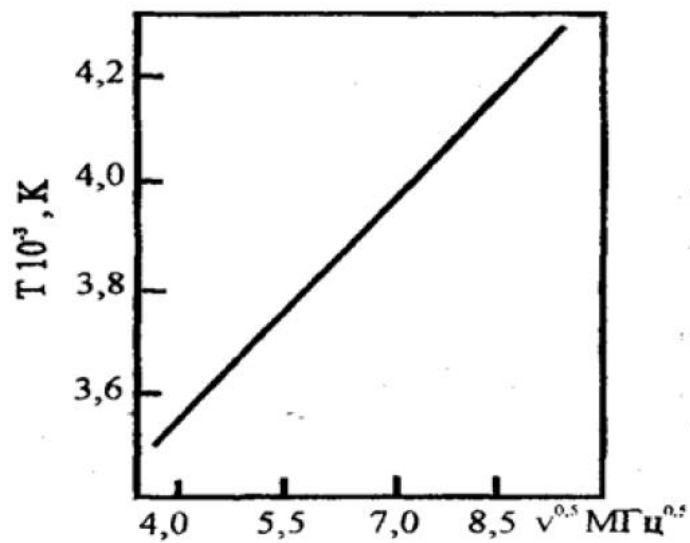


Рис. 1.1.5. Зависимость температуры в канале ВЧФР от частоты поля

Таблица 1.1.1 Значения температуры канала ВЧФР

Мощность, P_0 , Вт	Плазмообразующий газ	Частота, $\nu \cdot 10^{-6}$, Гц	Радиус канала ВЧФР, $a \cdot 10^2$, м	Длина разряда, $L \cdot 10^2$, м	Газовая температура (в канале), $T_g \cdot 10^{-3}$, К	Температура электронов (канала), $T_e \cdot 10^{-3}$, К	Ток в разряде, I, А	Напряженность электрического поля, $E \cdot 10^{-2}$, В/м	Концентрация электронов, $n_e \cdot 10^{-6}$, m^{-1}
500-600	Воздух	6-20	-	15-20	-	-	-	-	-
20-200	Воздух	12-100	0,24-0,34	0,3-36,6	3,3-4,3	-	0,01-0,14	-	-
-	Воздух	30	-	-	3,8-4,2	-	-	300-500	$5 \cdot 10^{10}$ - 10^{11}
30	Азот	30	-	-	3,8	-	-	-	10^{11} - 10^{12}
15-308	Воздух	8,7	-	-	-	-	$4 \cdot 10^{-3}$ - $3 \cdot 10^{-2}$	-	-
-	Воздух	40	-	-	3,5	7,0	1,24	-	-
500-600		34	-	-	0,9	7,4	-	-	$3,2 \cdot 10^{15}$ - $1,5 \cdot 10^{15}$
500-600		34	-	-	-	7,8	-	-	$0,7 \cdot 10^{15}$ - $1,9 \cdot 10^{15}$
100	Гелий	26	-	-	0,9	25	-	-	$1,2 \cdot 10^{15}$ - $3,0 \cdot 10^{15}$
-	Воздух	-	-	-	3,8-4,2	-	-	-	-
-	Азот	-	-	-	4,0	-	-	-	-
-	Аргон	-	-	-	1,4	-	-	-	-
-	Воздух	-	-	-	3,0-5,0	6,5	-	300-500	-
-	Аргон	-	-	-	1,4-2,0	6,0-7,0	-	12-13	-
920	Воздух	37	1,17	-	3,8	-	-	500	$7 \cdot 10^{11}$
1020	Воздух	37	0,25	-	4,2	-	-	400	$6 \cdot 10^{12}$
800	CO ₂	37	0,14	-	-	-	-	-	$3 \cdot 10^{11}$
670	CO	37	0,10	-	-	-	-	-	$1,5 \cdot 10^{12}$
750	O ₂	37	0,15	-	-	-	-	-	$1,3 \cdot 10^{12}$
200-800	Воздух	40	-	-	3,5-3,9	-	-	-	-
-	Воздух	40	-	5,22	-	-	0,8-1,6	-	-
150-1000	Воздух	-	0,06-0,18	3,1-2,8	-	-	-	-	-
16000	Воздух	0,75	1,2	-	-	-	-	-	-

Исследования по пространственному распределению температур (рис. 1.1.6, 1.1.7) показывают существенное падение температур в радиальном направлении, а также относительно слабое падение осевой температуры ($dT/dr \geq dT/dz$). Обратим внимание, что температура ВЧФР в молекулярных газах составляет $(3 \div 5) \cdot 10^3$ К. Это различие связано с большей эффективностью передачи энергий от электронов к тяжелым частицам в молекулярных газах в сравнении с атомарными. «В случае даже незначительных добавок молекулярного газа температура ВЧФР горящего в атомарном газе значительно повышается» [3].

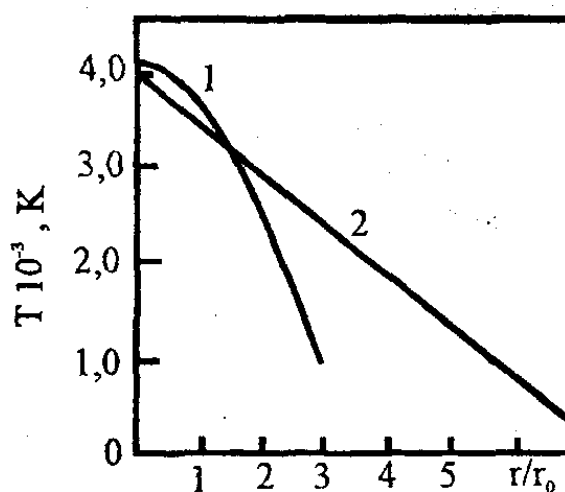


Рис. 1.1.6. радиальное распределение ВЧФР температуры

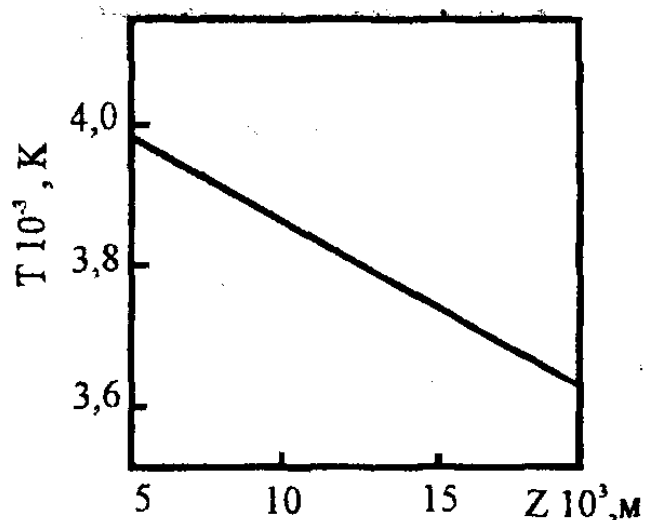


Рис. 1.1.7. Распределение температуры вдоль оси свободного ВЧФР

Сравнение результатов измерений газовой температуры с температурой электронов показывает, что при частоте поля в десятки мегагерц

различие между ними порядка ($T_e/T = 1,5 - 2,5$). Однако, в случае, когда частота запитывающего разряд поля лежит в СВЧ диапазоне разница между электронной температурой и газовой становится более существенной ($T_e/T = 5 - 25$). В работе [15] определено, что «распределение электронов по скоростям в канале ВЧФР имеет вид, отличающийся от максвелловского». Следовательно, можно сделать вывод, что плазма ВЧФР является неравновесной.

В большей степени характеристики разрядной плазмы ВЧФР зависят от частоты электромагнитного поля, мощности подводимой к разряду и величины расхода плазмообразующего газа. В работе [16] показано, что «с уменьшением частоты (при неизменной мощности) увеличивается длина канала разряда и уменьшается температура плазмы». Изменение длины канала разряда в зависимости от частоты электромагнитного поля показано на рис. 1.1.3.

Исходя из работы [7] вышеотмеченная зависимость имеет логарифмический характер. Авторы работы [17] предлагают использовать зависимость вида $L \sim \omega^{1/2}$,

где L – длина канала разряда, ω – частоты электромагнитного поля.

Также интерес представляет процесс передачи энергии от электромагнитного поля к плазме ВЧФР. Так, авторы работы [3] высказывают предположение о «влиянии на механизм передачи электромагнитной энергии процессов диссоциативной рекомбинации». В ВЧФР горящем в воздухе или азоте при атмосферном давлении вблизи электрода присутствуют ионы N_2^+ , с потенциалом возбуждения 18 эВ. Данные молекулярные ионы диффундируют от электрода в разрядную плазму, где за счет столкновений с электронами они диссоциативно рекомбинируют в атомы азота. Так как энергия диссоциации молекулярного азота составляет 9,7 эВ, атомы, которые образуются в следствии этого процесса, получают кинетическую энергию 8,3 эВ, которая после столкновений быстро диссоциирует в основном в виде хаотического теплового движения частиц плазмы. «Этот механизм передачи

электромагнитной энергии подтверждается измерениями температуры разряда, горящего в молекулярных газах с различными энергиями диссоциации» [15].

При описании ВЧФР большое значение имеет определение таких величин как емкостное сопротивление, адмитанс, активное сопротивление плазмоида ВЧФР. В работе [18] показано, что «теоретический расчет вышеуказанных величин, основывающийся только на геометрических характеристиках плазмоида разряда без учета происходящих в нем физических процессов приводит к серьезным ошибкам». По этой причине большинство работ по определению электрических параметров разряда носит экспериментальный характер.

Авторами работы [19] на рис.1.1.8 показаны «зависимости, для емкостного сопротивления, проводимости и адмитанса плазмоида ВЧФР, горящего при атмосферном давлении в воздухе и аргоне в зависимости от величины высокочастотной мощности, подводимой к разряду». На основании рис. 1.1.8 можно сделать вывод, что электрические характеристики плазмоида ВЧФР в значительной степени зависят от рода плазмообразующего газа и геометрических размеров разряда, которые также зависят от величины высокочастотной мощности.

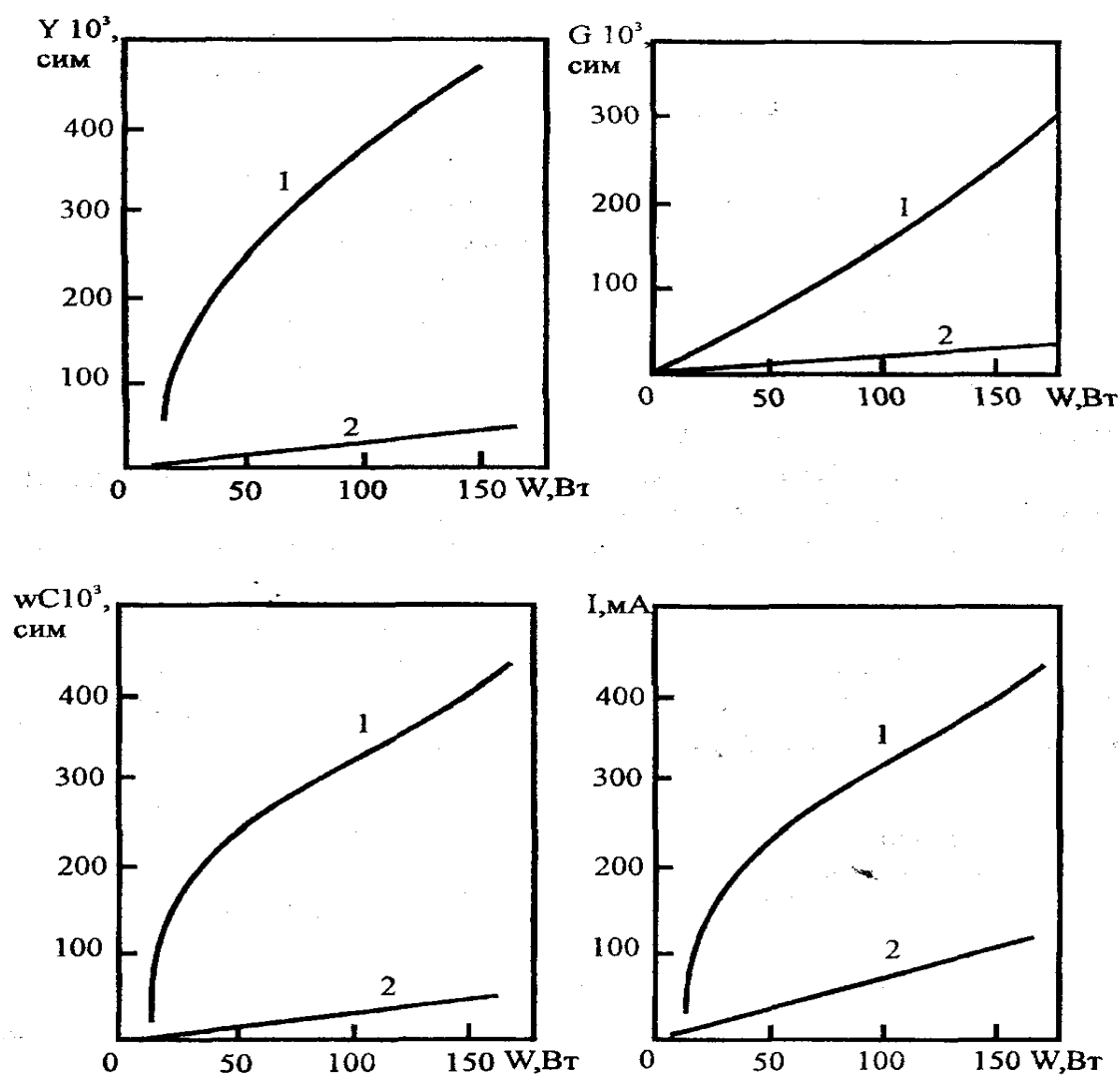


Рис. 1.1.8. Зависимость емкостного сопротивления ωC , проводимости G , адмитанса Y и тока I от мощности $W_{\text{разряда}}$
1 - воздух; 2 – аргон

Регистрация процессов, происходящих в плазме ВЧФР и их влияние на результаты расчетов электрических параметров плазмоида разряда, рассмотрены в работе [19]. Из результатов работ [11, 15] также следует, что «вольтамперная характеристика ВЧФР (рис. 1.1.8, таблица 1.1.1) имеет возрастающий характер».

1.2. Диагностика плазмы ВЧФР и ее специфика

Рассматривая практическое применение высокочастотного факельного разряда наибольший интерес вызывает измерение его газовой температуры. В

большей части плазмохимических реакций основными факторами являются не только газовая, но и электронная температуры. В связи с этим множество работ посвящено измерению газовой и электронной температур факельного разряда. Также большой интерес представляет вопрос о наличии полного или частичного термодинамического равновесия в плазме разряда. Для того, чтобы согласовать разряд и высокочастотный генератор необходимо знать его электрофизические характеристики, и вдобавок уметь измерять его мощность.

Вышеперечисленные вопросы рассматриваются различными авторами с момента открытия факельного разряда до сих пор. Множество исследований посвящено изучению параметров факельного разряда, горящего в воздухе. Изучение параметров разряда, горящего в других средах, исследовано в меньшей мере.

Спектры высокочастотного факельного разряда в воздухе и азоте очень схожи и состоят из полос гидроксила, β , γ – систем NO и второй положительной системе азота. В приэлектродной области помимо этих полос наблюдаются еще полосы первой отрицательной системы N_2^+

При горении высокочастотного факельного разряда в воздухе имеет место быть измерение его газовой температуры по относительной интенсивности линий вращательных спектров азота и гидроксила. Очень сложно измерять температуру газа по полосам стабильных в канале разряда молекул азота из-за наложения на них спектра гидроксила, так-как он более интенсивен и перекрывает диапазон длин волн от 280 до 370 нм. Определение газовой температуры по молекулярному спектру гидроксила требует установления равновесности распределения интенсивностей во вращательной структуре полос. В работе [23] показано, что «В канале факельного разряда, горящего в воздухе, при давлениях выше 13 кПа вращательная температура молекул гидроксила совпадает с температурой нейтрального газа. По этой причине измерение газовой температуры в воздушной плазме факельного разряда, горящего при атмосферном давлении, как правило проводят по молекулярному спектру гидроксила». Результаты измерений газовой

температуры факельного разряда, горящего при атмосферном давлении в воздухе, и в некоторых других средах, приведены в таблице 1.2.1. Из таблицы 1.2.1 можно сделать вывод, что температура разряда, горящего в одноатомных газах значительно ниже температуры разряда, горящего в молекулярных газах. Данное различие связано с большей эффективностью передачи энергии от электронов к тяжелым частицам в молекулярных газах в сравнении с атомарными.

Таблица 1.2.1

№	Плазмообразующий газ	Частота, МГц	Температура, К
1	Воздух	10	3000
2	Воздух	22,9	2900
3	Воздух	32,3	3610
4	Воздух	62,5	3850
5	Воздух	84,5	4100
6	Воздух	915	3800
7	Воздух	2400	5300...5600
8	Азот	2400	4000
9	Аргон	2400	1400...2000
10	Аргон	34	2000
11	Воздух	81,6	3380
12	Гелий	26,4	880

«Измерение электронной температуры плазмы факельного разряда осуществляется либо по относительной интенсивности линий атомарного спектра, либо по интенсивности непрерывного излучения в определенном диапазоне длин волн».

Концентрация электронов в плазме разряда, горящего при атмосферном давлении, определяется спектральными и микроволновыми методами. Микроволновым методом можно определить концентрации

электронов и частоту их столкновений с тяжелыми частицами. На рис.1.2.1 приведены результаты измерений микроволновым методом осевого распределения концентрации электронов и эффективной частоты их столкновений с тяжелыми частицами для высокочастотного факельного разряда, мощностью 1 кВт, горящего в воздухе при атмосферном давлении, и частотой электромагнитного поля 30 МГц.

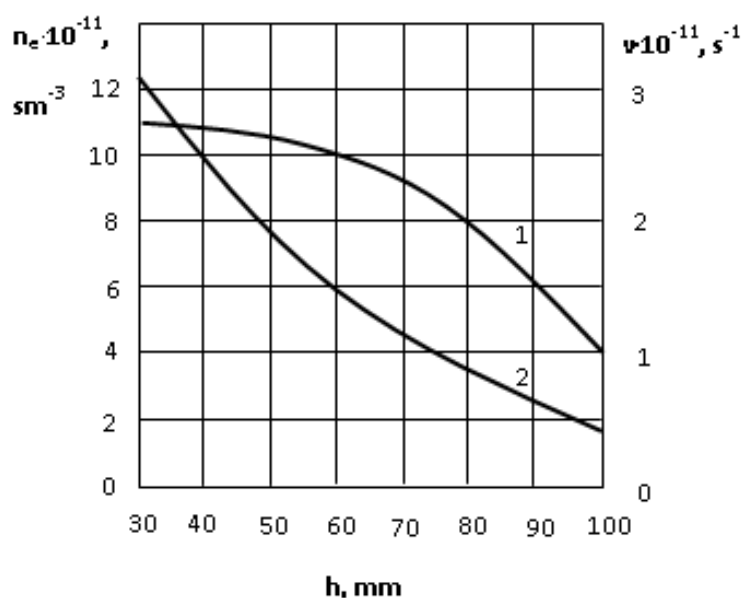


Рис. 1.2.1

Но в то же время микроволновой метод имеет малое пространственное разрешение и в результате этого позволяет оценивать вышеуказанные параметры только усредненными по сечению разряда. Спектральные же методы позволяют провести оценку концентрации электронов непосредственно в канале разряда. Чаще всего для этого используется переменный эффект Штарка, являющийся причиной уширения спектральных линий в интенсивных электромагнитных полях. Результаты измерений параметров электронной компоненты плазмы высокочастотного факельного разряда, горящего при атмосферном давлении, представлены в таблице 1.2.2.

Таблица 1.2.2

№	Плазмообразующий газ	Частота, МГц	Концентрация электронов, м ⁻³	Температура Электронов, К
1	Воздух	30	$5 \cdot 10^{16} \dots 10^{17}$	4500...6000
2	Воздух	915	10^{19}	130000
3	Воздух	1500	10^{19}	8700...1390
4	Азот	2400	$10^{16} \dots 10^{17}$	-
5	Аргон	2400	$10^{16} \dots 10^{18}$	-
6	Гелий	26,4	$5,3 \cdot 10^{21}$	$2,5 \cdot 10^4$
7	Аргон	34	$1,6 \cdot 10^{20}$	7000
8	Воздух	30	$9 \cdot 10^{17}$	-

Исходя из данных таблицы 1.2.2 видно, что электронная температура больше газовой температуры. Для молекулярных газов различие между электронной и газовой температурами сравнительно мало и составляет 500...1500°K. У атомарных газов же это различие существенно больше. К примеру, у аргона это различие составляет 5000...6000°K, а в случае гелия составляет десятки тысяч градусов. Это означает, что плазма высокочастотного факельного разряда не находится в состоянии термодинамического равновесия.

В молекулярных газах различие электронной и газовой температур возрастает при уменьшении мощности разряда и давления. На рис. 1.2.2 показаны результаты измерений электронной и газовых температур высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе, в зависимости от давления. Из рисунка можно сделать вывод, что с ростом давления анизотермия плазмы уменьшается.

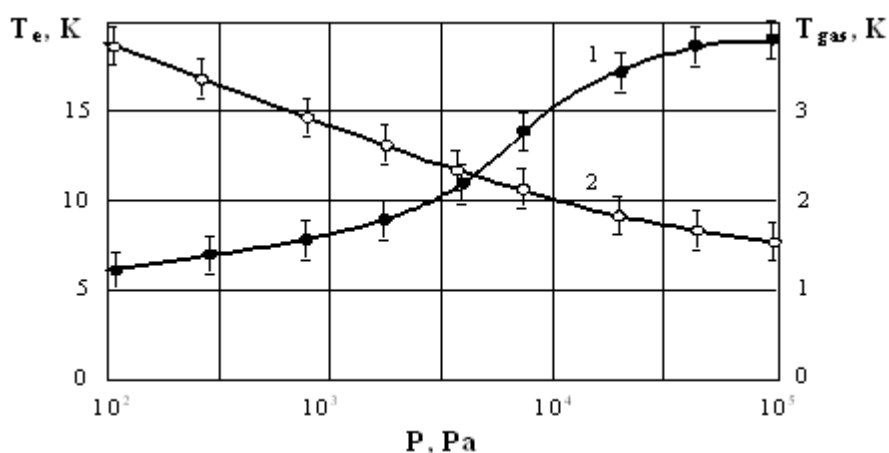


Рис. 1.2.2

Показанные в таблицах 1.2.1 и 1.2.2 значения электронных и газовых температур получались различными авторами на различных расстояниях от высокочастотного факельного разряда. Факел разряда неоднороден, как в радиальном, так и в осевом направлениях, следовательно, результаты различных авторов могут весьма значительно отличаться друг от друга.

Измерения осевого и радиального распределения температур факельного разряда проводились лишь в небольшом количестве работ. В работах [22] показано, что «изменение газовой температуры вдоль оси факельного разряда, горящего в воздухе, незначительно, и составляет 300...500К. А радиальное изменение температур воздушной плазмы разряда, наоборот, довольно значительно». Измерения показаны на рис. 1.2.3 и рис. 1.2.4.

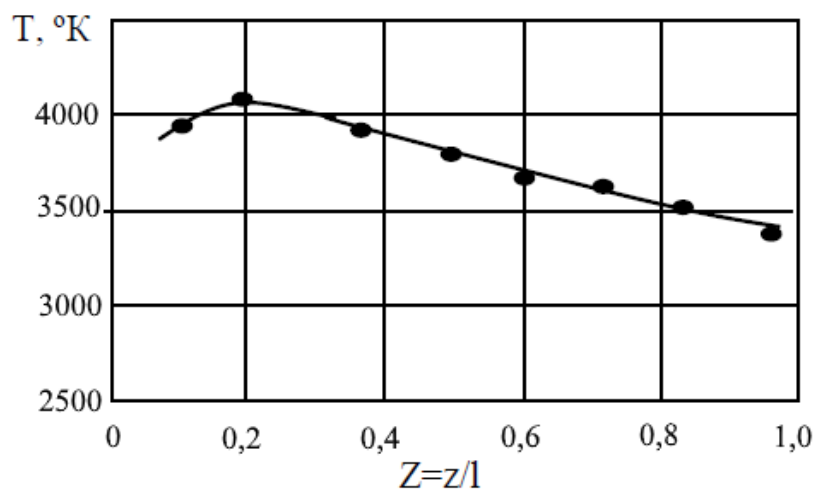


Рис. 1.2.3 Осевое распределение газовой температуры факельного разряда

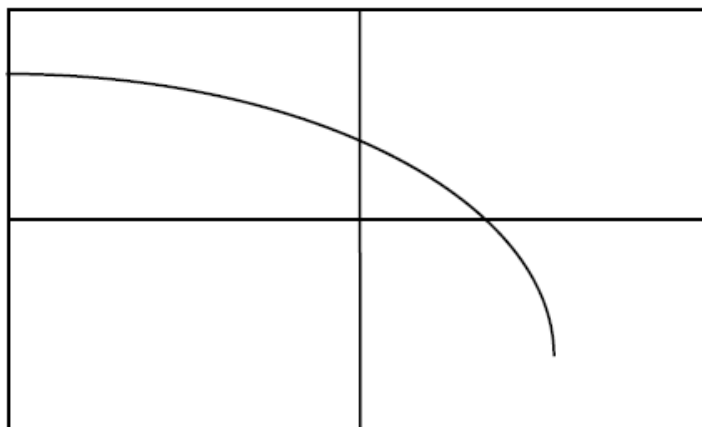


Рис. 1.2.4 Радиальное распределение газовой температуры

Влияние на пространственное распределение температур в высокочастотном факельном разряде могут оказывать как мощность и частота электромагнитного поля, так и скорость продува плазмообразующего газа. На рис. 1.2.5 приведена зависимость среднеосевой газовой температуры плазмы от скорости подачи плазмообразующего газа. Из рисунка 1.2.5 можно сделать вывод, что с увеличением скорости прокачки газа увеличивается среднеосевая газовая температура плазмы. Данный эффект можно объяснить тем, что с увеличением скорости продува газа происходит увеличение газовой температуры в центральной части разряда, в то время как на периферии газовая температура уменьшается.

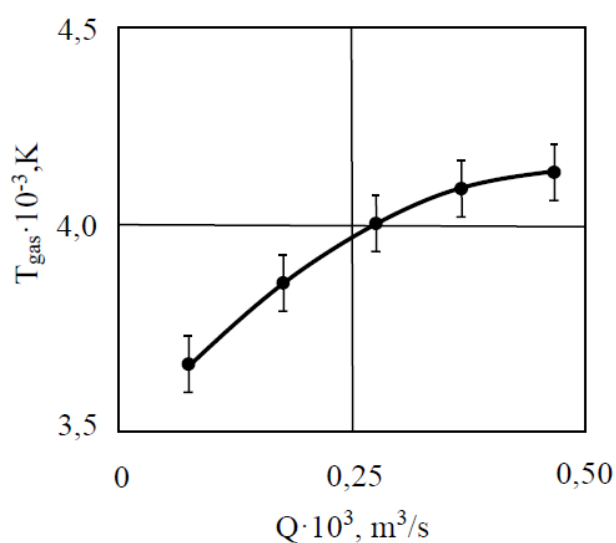


Рис. 1.2.5

Значения величины концентрации электронов, полученные разными авторами, отличаются друг от друга. Но, в общем, можно сказать, что концентрация электронов в плазме высокочастотного факельного разряда, горящего в молекулярных газах меньше концентрации электронов при горении высокочастотного факельного разряда в одноатомных газах.

Значения величин транспортных характеристик разрядной плазмы в значительной степени определяются видом функции распределения электронов по скоростям в плазме разряда. Впервые вид функции распределения электронов по скоростям в высокочастотном разряде был получен Маргенау [18]. «В этой работе предполагалось, что напряженность электрического поля невелика, и, следовательно, можно пренебречь неупругими столкновениями». Для высокочастотного факельного разряда, в особенности при его горении в молекулярных газах эти условия не соблюдаются. Следовательно, функция распределения электронов по скоростям в плазме высокочастотного факельного разряда отличается от распределения Маргенау.

Определению вида функции распределения электронов по скоростям в плазме высокочастотного факельного разряда посвящены работы [2, 20]. Данные работы являются теоретическими. На рис. 1.2.7 приведена функция распределения электронов по энергиям (кривая 2) для случая высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе при атмосферном давлении. Здесь газовая температура составляет $T = 4000^\circ\text{K}$, а напряженность электрического поля 300 В/см. Для сравнения, на том же рисунке, построены функция распределения Максвелла для $T = 4000^\circ\text{K}$ (кривая 1) и функция распределения Маргенау (кривая 3). Исходя из этого можно сделать вывод, что распределение электронов по энергиям в плазме высокочастотного факельного разряда существенно отличается от распределения Максвелла. Расчеты также показывают, что «вид функции распределения зависит от напряженности электрического поля. Вблизи электрода напряженность

электрического поля возрастает, электроны приобретают большие направленные скорости, и максимум функции распределения сдвигается вправо» [20].

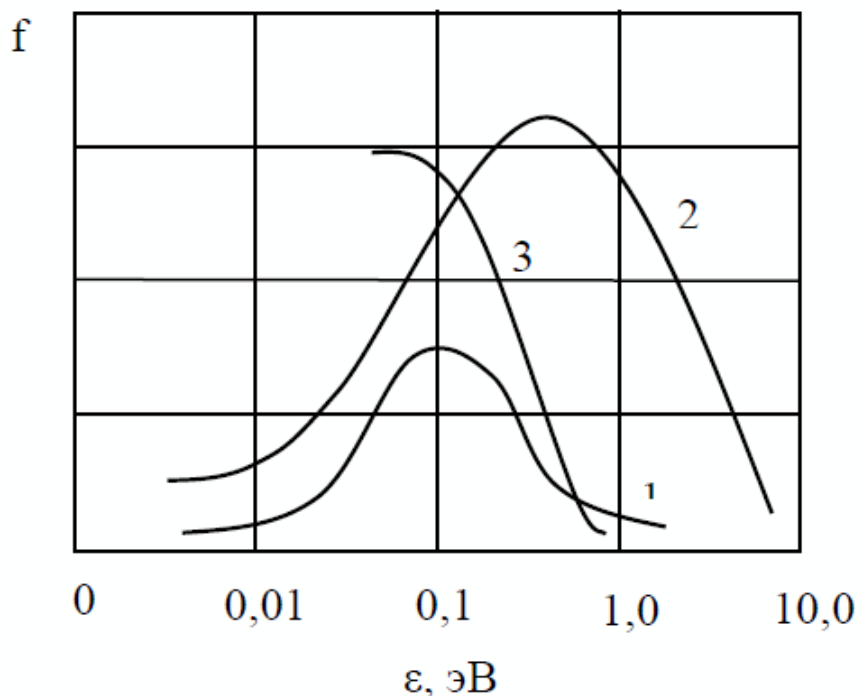


Рис. 1.2.7

«Экспериментальное определение функции распределения электронов по энергиям проводилось лишь для случая высокочастотного факельного разряда, возбуждаемого при пониженном давлении. Измерения проводились зондовым методом. Использовался известный способ определения функции распределения электронов по энергиям по второй производной зондового тока. Экспериментально полученная функция распределения электронов по энергиям для случая факельного разряда, горящего в воздухе при давлении 160 Па, приведена на рис. 1.2.8 Здесь же приведено максвелловское распределение, рассчитанное для данного случая. При расчете использовалась экспериментально полученная величина электронной температуры плазмы разряда. Как видно из рисунка функция распределения электронов по энергиям в отличии от максвелловского распределения имеет крутой спад в области высоких энергий» [25].

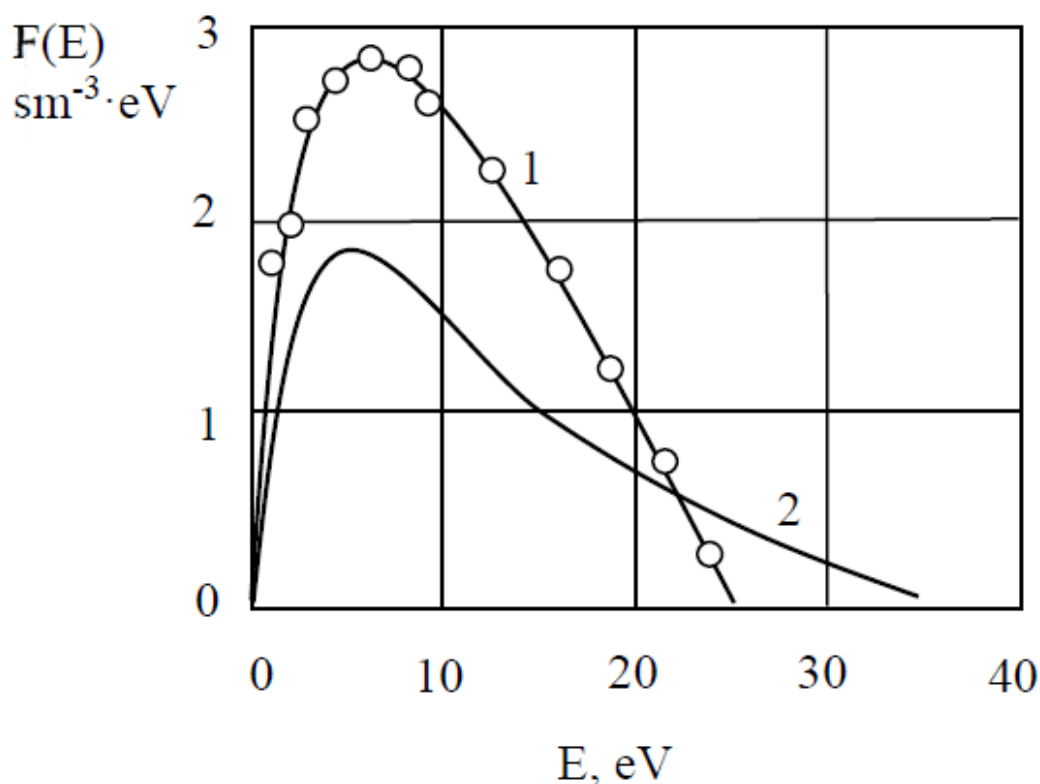


Рис. 1.2.8

Запыляющий материал вводится в разрядную плазму, в большинстве случаев, в виде капель, или в виде порошка. Ввиду этого, представляет собой интерес определение характеристик запыленной разрядной плазмы. Газовая и электронная температуры плазмы, сильно зависят от способности запыляющего материала поглощать или испускать электроны. Эта способность материала связана с его ионизационным потенциалом [9].

«Исследования характеристик разрядной плазмы высокочастотного факельного разряда, запыленного мелкодисперсными веществами, проводились с использованием веществ Al_2O_3 , Na_2SO_3 , $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, Ni, Fe с диаметром 20...60 мкм. В результате измерений было установлено увеличение высокочастотного тока в разряде при запылении его такими веществами, как Al_2O_3 , Na_2SO_3 , $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$. При запылении разряда веществами, имеющих потенциал ионизации больший, чем потенциал ионизации [26] кальция, изменение характеристик разряда не наблюдается. В частности, при запылении разряда Ni, Fe, изменение тока в разряде находится в пределах погрешности измерений» [24]. Зависимости газовой и электронной

температур плазмы высокочастотного факельного разряда, горящего в воздухе, от концентрации частиц Al_2O_3 представлены на рис. 1.2.9 и 1.2.10.

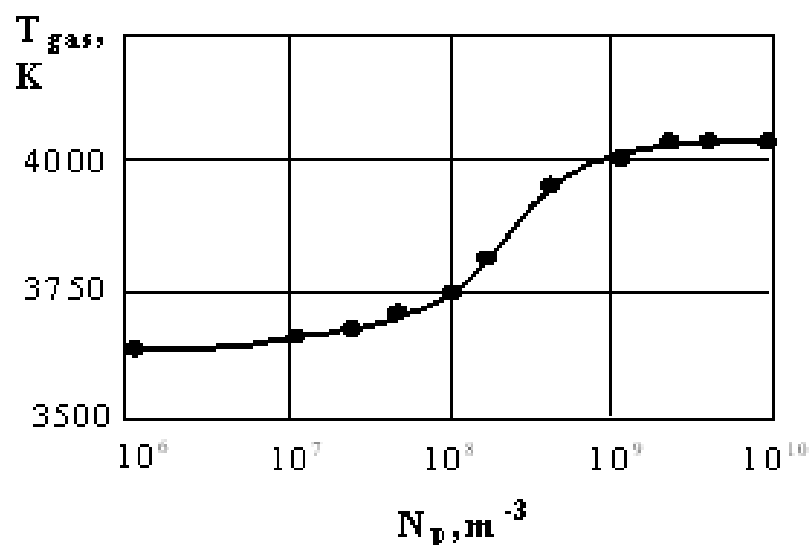


Рис. 1.2.9

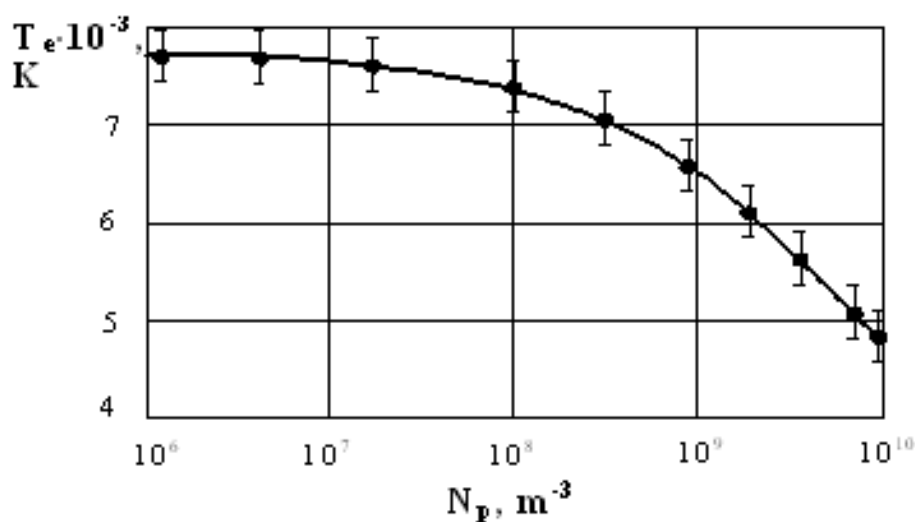


Рис. 1.2.10

Исходя из рисунков можно сделать вывод, что с ростом концентрации частиц происходит увеличение газовой температуры, что ведет к интенсификации плазмохимических процессов. Увеличение газовой температуры обусловлено ростом концентрации электронов. В то же время с ростом концентрации частиц Al_2O_3 происходит уменьшение электронной температуры плазмы разряда. Таким образом, с ростом концентрации частиц уменьшается анизотермия плазмы.

2 Особенности процесса горения запыленного высокочастотного факельного разряда.

Обычно в плазменной технологии газовые разряды используют только как источник плазменной струи. Но переработка веществ непосредственно в газовом разряде имеет преимущества в сравнении с переработкой веществ в самой плазменной струе. В первую очередь, в газовом разряде температура плазмы выше и имеет меньший осевой градиент температуры. Электрические поля и более высокая концентрация электронов в разрядной зоне делают каталитические свойства плазмы более выраженными.

Высокочастотный факельный разряд предпочтительнее других факельных разрядов потому, что он является более устойчивым к запылению плазмы разряда, имеет возможность зажигаться практически в любых средах, а также обладает большим объемом разрядной плазмы, даже, при относительно небольшой величине мощности, подаваемой в разряд.

Для того чтобы определить устойчивость разряда к запылению нами были проведены измерения электрофизических характеристик высокочастотного факельного разряда, запыленного диэлектрическими и проводящими материалами.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.1. Был использован высокочастотный факельный разряд с одним электродом, диаметром 48 мм. Разряд возбуждался в кварцевой трубке диаметром 36 мм. Горение разряда осуществлялось в воздухе при атмосферном давлении. Мощность разряда изменялась от 1 до 3 кВт. Частота электромагнитного поля составляла 40 МГц. Дисперсность запыляющих разряд материалов составляла 20...60 мкм. Порошок подавался в центральную зону разряда пневматическим питателем. Расход плазмообразующего газа составлял 0,6 м³/час.

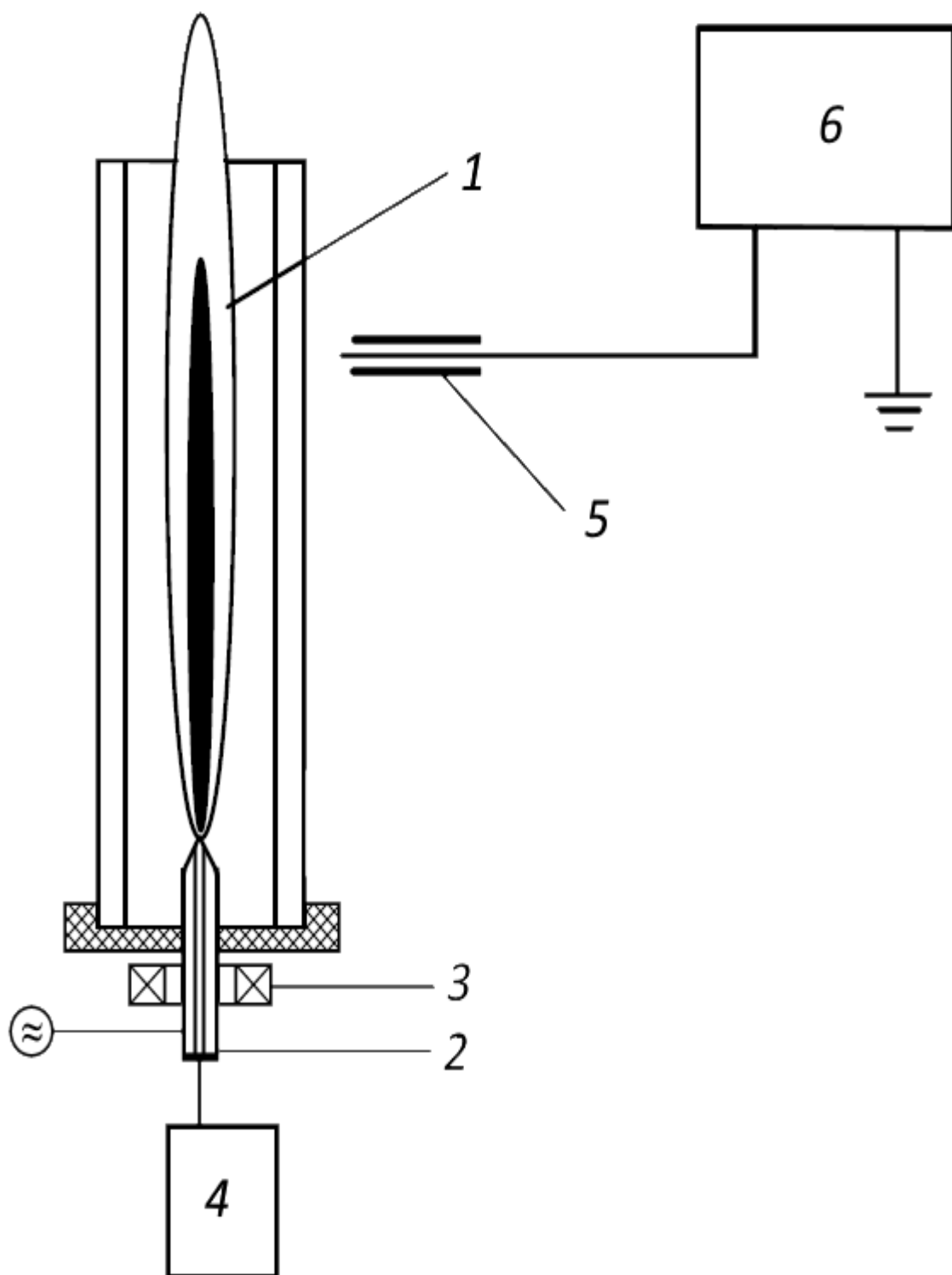


Рис. 2.1 Схема экспериментальной установки

*1 – ВЧ факельный разряд; 2 – электрод; 3 – пояс Роговского;
4 – пневматический питатель; 5 – емкостной зонд; 6 – осциллограф.*

Были проведены измерения вольтамперных характеристик высокочастотного факельного разряда в режиме свободного горения и в случае запыления плазмы разряда диэлектрическими и проводящими частицами. Степень запыления плазмы разряда изменялась от 0 до 10^{-4} . Измерение степени запыления разряда определялось как изменение веса распыляемого порошка за определенный промежуток времени работы экспериментальной установки. Измерение тока проводилось поясом Роговского. Измерение напряжения осуществлялось вольтметром ВЗ-52/1, снабженным дополнительным емкостным делителем.

В результате проведенных измерений было зафиксировано увеличение высокочастотного тока в разряде запыляемом оксидом алюминия (Al_2O_3), сульфатом натрия (Na_2SO_3) и ацетатом кальция ($\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$). Запыляя разряда никелем (Ni) и железом (Fe) изменение тока в разряде находилось в пределах погрешности измерений. Результаты измерений изменения тока в разряде при запылении его веществами с различным потенциалом ионизации приведены в таблице 2.1 и на рис. 2.2. По оси абсцисс отложена величина ионизационного потенциала (U, эВ), по оси ординат – отношение тока в запыленном разряде к току в свободном разряде (I/I_0). Обратим внимание, что при увеличении тока в разряде уменьшается напряжения на высоковольтном электроде. Так при запылении разряда оксидом алюминия ток возрастает на ~15%, в тоже время напряжение уменьшается на ~15%. Это означает, что мощность разряда не изменяется при его запылении. Степень запыления и дисперсность запыляющего материала относительно слабо воздействуют на сопротивление разрядной плазмы.

Таблица 2.1

I/I_0	1,27	1,12	1,03	1,00	1,00
U, эВ	5,25	5,93	7,00	7,80	8,67

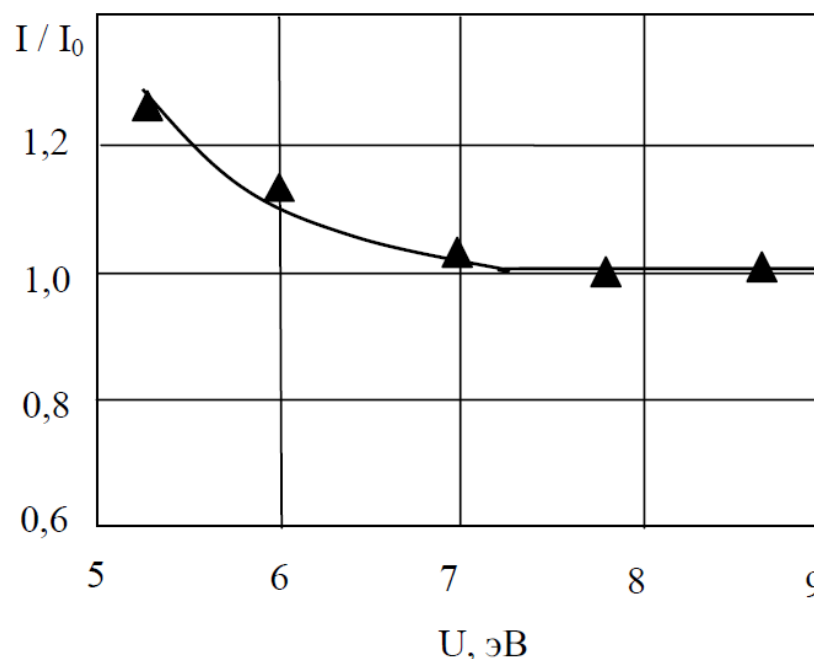


Рис. 2.2. Зависимость тока в разряде от величины ионизационного потенциала

Экспериментально было обнаружено, что высокочастотный факельный разряд имеет высокую устойчивость к запылению и диэлектриком и проводящим материалом. Обратим внимание, что преимущественно устойчивость разряда к запылению определяется устойчивостью его электродинамических характеристик в процессе запыления.

Вследствие этого были проведены измерения радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда. Измерения были проведены емкостным зондом, сигнал с которого подавался на вход осциллографа. Емкостной зонд представлял собой медный штырь диаметром 1 мм и длиной 3...5 мм. Результаты измерений представлены в таблице 2.2 и на рис. 2.3. В итоге измерений было обнаружено, что изменения в осевом распределении радиальной компоненты электрического поля высокочастотного факельного разряда при его запылении несущественны и прослеживается только небольшое увеличение амплитуды электрического поля вдоль оси разряда в случае его запыления проводящим материалом.

Таблица 2.2

Свободно горящий разряд	E_r , В/м	620	400	310	275	250	220	200	180	170
	Z , мм	15	37,5	50	75	87,5	110	130	150	170
разряд, запыленный никелем	E_r , В/м	-	430	365	310	300	280	250	220	210
	Z , мм	-	36	50	75	87,5	110	130	150	170

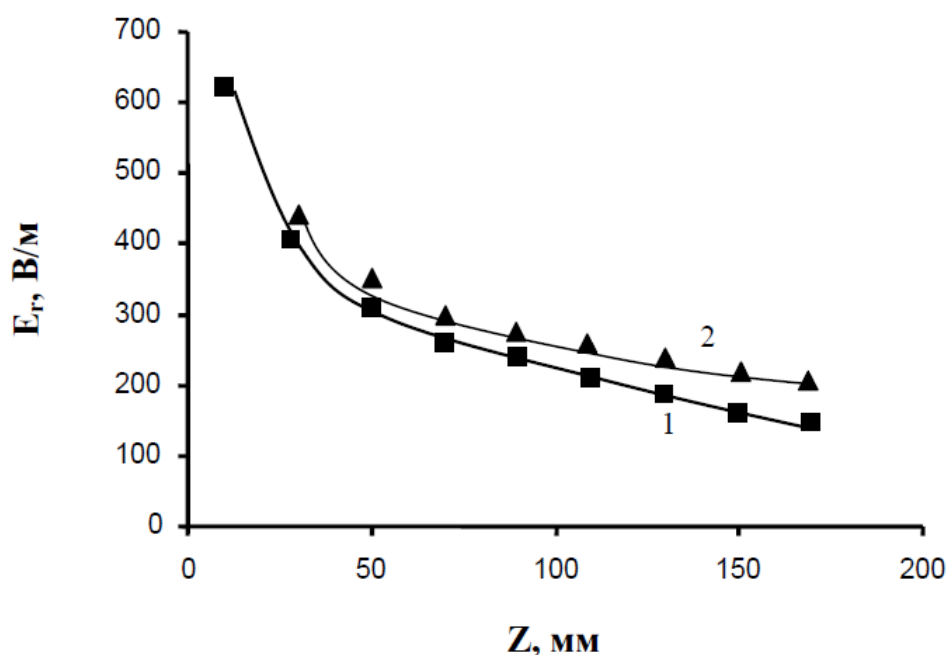


Рис. 2.3. Распределение электрического поля вдоль оси высокочастотного факельного разряда.

1 – свободно горящий разряд; 2 – разряд, запыленный никелем ($\nu = 10^{-4}$)

При распределении электромагнитной волны вдоль канала высокочастотного факельного разряда затухание электромагнитного поля в плазме разряда, а, следовательно, и доля энергии, которая затрачивается на поддержание процесса горения разряда определяется величиной коэффициента затухания электромагнитной волны. Сам коэффициент затухания можно определить из выражения для волнового числа (формула 2.1). Волновое число h поперечно-магнитной волны, распространяющейся вдоль канала разряда имеет следующий вид [27]:

$$h^2 = (\alpha + j\beta)^2 \approx -\frac{2}{5a^2\varepsilon'} \quad (2.1)$$

где h – волновое число; a – радиус канала разряда;
 $\varepsilon' = \varepsilon / \varepsilon_0$ – относительная величина комплексной диэлектрической
 проницаемости плазмы разряда; α – коэффициент затухания;
 β – коэффициент фазы.

Комплексную диэлектрическую проницаемость ε запыленной плазмы
 разряда можно определить по формуле Лоренца – Лорентца (формула 2.2) [28]:

$$\varepsilon = \varepsilon_2 \left[1 + \frac{v(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\varepsilon_2 + \frac{1-v}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \right] \quad (2.2)$$

Здесь: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – соответственно комплексные диэлектрические
 проницаемости запыляющего материала и плазмы; v – отношение объема
 запыляющего материала к общему объему запыленной плазмы.

Результаты расчета коэффициента затухания электромагнитной волны,
 распространяющейся в плазме высокочастотного факельного разряда
 мощностью 1 кВт в зависимости от степени ее запыления приведены в таблице
 2.3 и на рис. 2.4.

Таблица 2.3

Al ₂ O ₃	$\alpha, \text{м}^{-1}$	14	14	15	16	18	29
	$\lg v$	-4	-3	-2	-1	-0,45	-0,1
Ni	$\alpha, \text{м}^{-1}$	14	14	13,5	13	7	4
	$\lg v$	-4	-3	-2	-1	-0,4	-0,1

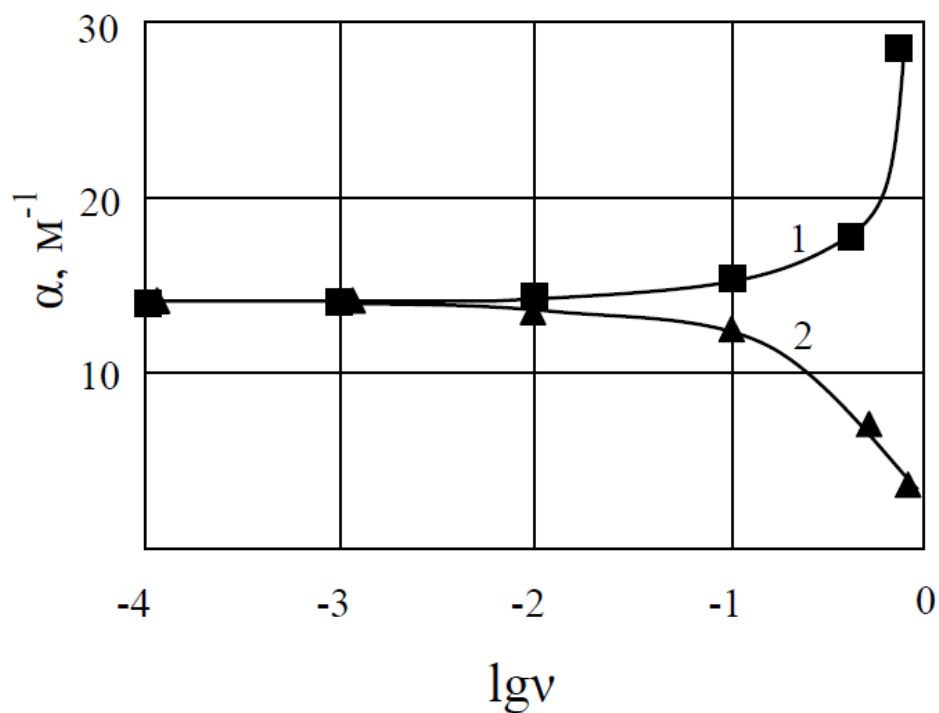


Рис.2.4. Зависимость коэффициента затухания электромагнитной волны в плазме разряда от степени ее запыленности. 1 – Al_2O_3 (диэлектрик);
2 – Ni (металл)

Исходя из рис. 2.4. можно сделать выводы, что изменение коэффициента затухания электромагнитного поля высокочастотного факельного разряда можно наблюдать только при степенях запыления газового разряда $\nu > 10^{-2}$. Такую величину запыления газового разряда практически невозможно реализовать. Реальные же степени запыления плазмы разряда при использовании пневматического питателя, составляют $\nu < 10^{-4}$.

Исходя из результатов расчетов можно сделать вывод, что горение высокочастотного факельного разряда устойчиво при его запылении диэлектрическими и проводящими материалами при $\nu < 10^{-2}$, что подтверждается результатами экспериментальных измерений.

3 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель раздела – комплексное описание и анализ финансово-экономических аспектов выполненной работы. Необходимо оценить полные денежные затраты на исследование, а также дать хотя бы приближенную экономическую оценку результатов ее внедрения. Это в свою очередь позволит с помощью традиционных показателей эффективности инвестиций оценить экономическую целесообразность осуществления работы.

3.1 Организация и планирование работ

Трудоемкость выполнения ВКР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Разделим выполнение выпускной квалификационной работы на этапы, представленные в таблице 3.1:

Таблица 3.1. Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
1. Разработка задания на НИР	НР	НР – 100%
2. Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР, И.	НР – 100% И. – 50%
3. Составление и утверждение ТЗ	НР, И.	НР – 100% И. – 10%
4. Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И.	НР – 30% И. – 100%
5. Разработка календарного плана	НР, И.	НР – 100% И. – 10%
6. Разработка концепта исследования	НР, И.	НР – 50% И. – 100%
7. Поиск методов решения	НР, И.	И. – 100%
8. Обобщение и оценка результатов	И.	И. – 100%
9. Оформление отчета по НИР	И.	И. – 100%
10. Оформление расчетно-пояснительной записки	И.	И. – 100%
11. Подведение итогов	НР, И.	НР – 60% И. – 100%

НР – научный руководитель; И. – студент.

3.1.1 Продолжительность этапов работ

Главным фактором отражения основной части стоимости научной разработки являются трудовые зарплаты. Исходя из этого, важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Для оценки трудоёмкости выполнения научного исследования выпускной квалификационной работы используют экспертный путь, определяемый человеко-днями. Для определения ожидаемого значения трудоемкости используют следующее соотношение:

$$t_{ожi} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5},$$

где $t_{ожi}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.

Для установления продолжительности этапов в рабочих днях используем формулу:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{вн}} \cdot K_{д}$$

где $t_{ож}$ – продолжительность работы, дн.;

$K_{вн}$ – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей, в частности, возможно $K_{вн} = 1$;

$K_{д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ ($K_{д} = 1-1,2$; в этих границах конкретное значение принимает сам исполнитель).

Для проведения научного исследования, представленного в выпускной квалификационной работе, выбирают специальную узко направленную

научную тему. Для этого строится специальный ленточный график проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Для построения графика необходимо перевести рабочие дни в календарные дни, для чего воспользуемся следующим соотношением:

$$T_{\text{КД}} = T_{\text{РД}} T_{\text{К}}$$

где $T_{\text{КД}}$ – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{\text{РД}}$ – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_{\text{К}}$ – коэффициент календарности, определяющийся выражением:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пд}}}$$

где $T_{\text{кал}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пд}}$ – количество праздничных дней в году.

Рассчитаем коэффициент календарности:

$$T_{\text{К}} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205$$

Результаты расчетов представлены в таблицах 3.2, 3.3.

Таблица 3.2 Трудозатраты на выполнение работ

Этап	Испол- нители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям, чел. - дн.			
		t_{min}	t_{max}	$t_{\text{ож}}$	$T_{\text{РД}}$		$T_{\text{КД}}$	
					НР	И.	НР	И.
Составление и утверждение технического задания	НР	3	5	3,8	4,56	0,46	5,53	0,55
Подбор и изучение материалов по теме	НР, И.	15	20	17	2,04	2,4	2,47	24,72
Календарное планирование работ по теме	НР, И.	2	4	2,8	3,36	1,68	4,04	2,04
Составление эксперимента	НР, И.	5	7	5,8	5,57	3,48	6,75	4,22
Экспериментальное исследование	НР, И.	2	3	2,4	1,73	1,44	2,09	1,75
Анализ и обработка полученных результатов	НР, И.	5	8	6,2	3,72	7,44	4,5	9,02
Оформление пояснительной записки к ВКР	И.	10	15	12	-	14,4	-	17,45
Подготовка к защите ВКР	И.	5	6	5,4	1,9	6,48	2,36	7,85
Итого				55,4	22,92	55,78	27,78	67,6

Таблица 3.3. Линейный график работ

Этап	НР	И.	Март			Апрель			Май		
			10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	4,56	0,46	■								
2	20,4	20,4	■	■	■						
3	3,36	1,68			■	■					
4	5,57	1,48				■	■				
5	1,73	1,44					■	■			
6	3,72	7,44					■	■			
7	-	14,4						■	■	■	
8	1,9	6,48							■	■	

НР - ■ ; И. - ■ .

3.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

Таблица 3.4. Расчет затрат на материалы

Наименование	Единица измерения	Количество	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Оксид алюминия (Al ₂ O ₃)	кг	1	85	85
Никель (Ni)	кг	1	786	786
Бумага для принтера формата А4	уп.	1	250	250
Картридж для принтера	шт.	1	1550	490
Итого				1611

Допустим, что ТЗР составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны

$$C_{\text{мат}} = 1611 \cdot 1,05 = 1691,55 \text{ руб.}$$

3.2.2 Расчет заработной платы

Среднедневная тарифная заработная плата (ЗП_{дн-т}) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = МО/25,083$$

учитывающей, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце в среднем 25,083 рабочих дня (при шестидневной рабочей неделе).

Расчет затрат на полную заработную плату приведен в таблице 3.5. Затраты времени по каждому исполнителю в рабочих днях с округлением до целого взяты из таблицы 3.2. Для учета в ее составе премий, дополнительной зарплаты и районной надбавки используется следующий ряд коэффициентов: $K_{\text{ПР}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_{\text{р}} = 1,3$. Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент $K_{\text{и}} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$. Вышеуказанное значение $K_{\text{доп.ЗП}}$ применяется при шестидневной рабочей неделе, при пятидневной оно равно 1,113, соответственно в этом случае $K_{\text{и}} = 1,62$.

Таблица 3.5. Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33664	1342,09	23	1,699	52445,41
И.	15470	616,75	56	1,699	58680,29
Итого:					111125,7

3.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Затраты на единый социальный налог (ЕСН), включающий в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование, составляют 30 % от полной заработной платы по проекту, т.е.

$$C_{\text{соц.}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,3;$$

$$C_{\text{соц.}} = 111125,7 \cdot 0,3 = 33337,71 \text{ руб.}$$

3.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об.}} \cdot t_{\text{об.}} \cdot C_{\text{э}}$$

где $P_{\text{об.}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{об.}}$ – время работы оборудования, час.

Для ТПУ $C_{\text{э}} = 5,748$ руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 3.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об.}} = T_{\text{рд}} \cdot K_t$$

где $K_t \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно. В ряде случаев возможно определение $t_{\text{об.}}$ путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об.}} = P_{\text{ном.}} \cdot K_C$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_C = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$, час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$, кВт	Затраты $\Sigma_{\text{ОБ}}$, руб.
Персональный компьютер	160	0,5	459,84
Струйный принтер	2	0,1	1,15
Экспериментальная установка	42	1	241,42
Итого:			702,41

3.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Используется формула:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{N_{\text{А}} * C_{\text{ОБ}} * t_{\text{рф}} * n}{F_{\text{д}}},$$

где $N_{\text{А}}$ – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$ – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР. При невозможности получить соответствующие данные из бухгалтерии она может быть заменена действующей ценой, содержащейся в ценниках, прейскурантах и т.п.;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году. При этом второй

вариант позволяет получить более объективную оценку C_{AM} . Например, для ПК в 2019 г. (298 рабочих дней и восьмичасовой рабочий день) можно принять

$$F_d = 298 \cdot 8 = 2384 \text{ часа};$$

t_{pf} – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

n – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Постановление правительства РФ «О классификации основных средств, включенных в амортизационные группы», позволяет получить рамочные значения сроков амортизации (полезного использования) оборудования $\equiv C_A$. Например, для ПК это $2 \div 3$ года. Необходимо задать конкретное значение C_A из указанного интервала, например, 2,5 года. Далее определяется H_A как величина обратная C_A , в данном случае это $1 : 2,5 = 0,4$.

Стоимость ПК 60000 руб, время использования 160 часов, тогда для него

$$C_{AM}(ПК) = (0,4 \cdot 160 \cdot 60000 \cdot 1) / 2384 = 1610,74 \text{ руб.}$$

Итого начислено амортизации 1610,74 руб.

Амортизационные отчисления для экспериментальной установки не подлежат расчету, так как срок ее службы истек.

3.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на выполнение проекта, которые не учтены в предыдущих статьях, их принимают равными 10% от суммы всех предыдущих расходов, т.е.

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot 0,1$$

$$C_{\text{проч.}} = (1691,55 + 111125,7 + 33337,71 + 702,41 + 1610,74) \cdot 0,1 = 14846,81 \text{ руб.}$$

3.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта «Макет демонстрационной модели принципов КТ».

Таблица 3.7. Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	1691,55
Основная заработная плата	$C_{\text{зп}}$	111125,7
Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	33337,71
Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл.}}$	702,41
Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	1610,74
Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	14846,81
Итого:		163314,92

Таким образом, затраты на разработку составили $C = 163314,92$ руб.

3.2.8 Расчет прибыли

Если исполнитель работы не располагает данными для применения «сложных» методов, то прибыль принимают в размере $5 \div 20 \%$ от полной себестоимости проекта. В нашем случае прибыль составляет $G = 32662,98$ руб. (20%) от расходов на разработку проекта.

3.2.9 Расчет НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли. В нашем случае это $(163314,92 + 32662,98) \cdot 0,2 = 39195,58$ руб.

3.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 163314,92 + 32662,98 + 39195,58 = 235173,48 \text{ руб.}$$

3.3 Оценка экономической эффективности проекта

Этот проект научный, поэтому установить экономический эффект при вложении на данном этапе исследований невозможно.

4. Социальная ответственность

В современных условиях труда для снижения возможностей получения травм и подверганию вредным воздействиям используется повсеместная комплексная охрана труда.

Охрана труда – система сохранения жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности, включающая в себя правовые, социально-экономические, организационно-технические, санитарно-гигиенические, лечебно-профилактические, реабилитационные и иные мероприятия.

Вредный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его заболеванию.

Опасный производственный фактор – производственный фактор, воздействие которого на работника может привести к его травме [Статья 209 ТК РФ].

4.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

В таблице 4.1 представлены основные виды работ которые могут привести к воздействию опасных и вредных факторов.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Наименование видов работ и параметров производственного процесса	Вредные факторы	Опасные факторы	Нормативные документы
К. 0016 Работы с ВЧФР	—	Температура	ГОСТ 12.4.026. Термобезопасность. Общие требования.
К. 316 Работа с ПК	—	Высокое напряжение	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	Ультрафиолетовое излучение	—	ГОСТ 12.4.080-79 ССБТ. Светофильтры стеклянные для защиты глаз от вредных излучений на производстве
	Воздействие радиации (ВЧ,УВЧ,СВЧ и т.д.)	—	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.
	—	Пожарная опасность	ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ. Пожарная безопасность

Производственными условиями труда – называется совокупность факторов производственной среды, оказывающих влияние на здоровье и работоспособность человека в процессе труда.

Факторы классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические. На инженера, работа которого связана на компьютере, воздействуют следующие факторы:

- физические: температура и влажность воздуха; шум; статическое электричество; электромагнитное поле низкой чистоты; освещённость; наличие излучения;
- психофизиологические.

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы, делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

4.2 Обоснование и разработка мероприятий по снижению уровней опасного и вредного воздействия и устранению их влияния на персонал.

4.2.1 Организационные мероприятия

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь увечий и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

4.2.2 Организация рабочего места оператора ПК

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства, как показано на рисунке 4.1.

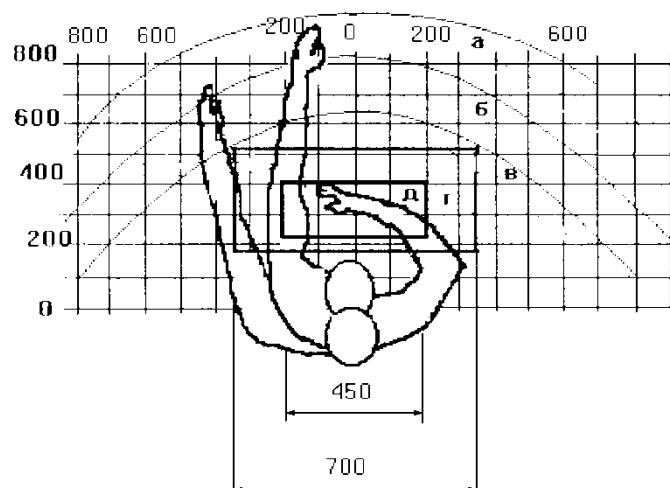


Рисунок 4.1 - Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости

а - зона максимальной досягаемости рук;

б - зона досягаемости пальцев при вытянутой руке;

в - зона легкой досягаемости ладони;

г - оптимальное пространство для грубой ручной работы;

д - оптимальное пространство для тонкой ручной работы.

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости рук: дисплей размещается в зоне а (в центре); клавиатура – в зоне г/д; системный блок размещается в зоне б (слева); принтер находится в зоне а (справа); документация: в зоне легкой досягаемости ладони – в (слева) – литература и документация, необходимая при работе; в выдвижных ящиках стола – литература, не используемая постоянно.

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования.

Высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм. Высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм. Рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и

длиной не менее 1400 мм. Должно иметься пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной – не менее 500 мм, глубиной на уровне колен – не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а так же расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглублённым передним краем.

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45 градусов к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30 градусов. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране.

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15 градусов. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами. Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели.

При однообразной умственной работе, требующей значительного нервного напряжения и большого сосредоточения, рекомендуется выбирать неяркие, малоконтрастные цветочные оттенки, которые не рассеивают внимание (малонасыщенные оттенки холодного зеленого или голубого

цветов). При работе, требующей интенсивной умственной или физической напряженности, рекомендуются оттенки тёплых тонов, которые возбуждают активность человека.

4.2.3 Условия безопасной работы

Основные параметры, характеризующие условия труда это: микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата устанавливаются в соответствии с [17] и приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Оптимальные параметры микроклимата.

Период года	Температура, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	22-24	21-25	40-60	0,1
Тёплый	23-25	22-26	40-60	0,1

Таблица 4.3 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с
	Диапазон ниже допустимого значения	Диапазон выше допустимого значения			Для диапазона выше допустимого значения
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	19,0-26,0	15-75	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	20,0-29,0	15-75	0,2

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. В помещение должны подаваться следующие объёмы наружного воздуха: при объёме помещения до 20 м³ на человека – не менее 30 м³ в час на человека; при объёме помещения более 40 м³ на человека и отсутствии выделения вредных веществ допускается естественная вентиляция.

Система отопления должна обеспечивать достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. В помещениях с повышенными требованиями к чистоте воздуха должно использоваться водяное отопление. Параметры микроклимата в используемой лаборатории регулируются системой центрального отопления, и имеют следующие значения: влажность – 40%, скорость движения воздуха – 0,1 м/с, температура летом – 20-25 °С, зимой – 13-15 °С. В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что приточный воздух поступает в помещение без предварительной очистки и нагревания.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное

воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне. При выполнении работы на ПЭВМ уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видео-кабеля. Согласно [17], напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 25В/м;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 2,5В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5Гц-2кГц - 250нТл;
- в диапазоне частот 2кГц-400кГц - 25нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других средств индивидуальной защиты.

При работе с компьютером источником ионизирующего излучения является дисплей. Под влиянием ионизирующего излучения в организме может происходить нарушение нормальной свертываемости крови, увеличение хрупкости кровеносных сосудов, снижение иммунитета и др. Доза облучения при расстоянии до дисплея 20 см составляет 50мкбэр/час. По нормам [17], конструкция ЭВМ должна обеспечивать мощность экспозиционной дозы рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05м от экрана не более 100 мкР/час.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной

освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света.

4.3 Требования безопасности при работе с высокочастотным факельным плазмотроном

При работе с высокочастотным факельным разрядом необходимо соблюдать ряд требований безопасности:

1. К работе на ВЧФР (далее установка) допускаются лица, не моложе 18-ти лет, прошедшие медосмотр, инструктаж на рабочем месте, имеющие профессиональную подготовку, соответствующую характеру работ, прошедшие проверку знаний по вопросам охраны труда. Периодичность повторного инструктажа один раз в квартал.

2. Работники, осуществляющие пуско-наладочные, ремонтные работы, периодические плановые осмотры, а также отработку плазмохимической технологии в электроустановках выше 1000В, должны иметь IV группу по электробезопасности, остальные работники – III группу.

3. Все виды работ на установке производятся группой не менее 2-х человек, один из которых имеет IV квалификационную группу по электробезопасности (при напряжении выше 1000 В).

4. Работы по наладке, настройке и регулированию технологических режимов работы установки производятся работниками в соответствии с настоящей инструкцией.

5. Все работы по наладке и настройке генератора производятся по письменному распоряжению и в соответствии с «Программой пуско-наладочных работ для генератора ВЧГ8-60/13».

6. Установка состоит из высокочастотного генератора (источника питания) и технологического блока, которые размещены в металлических корпусах. Технологический блок включает следующие основные узлы:

высокочастотный плазмотрон факельного типа, реактор, узел «мокрой» очистки отходящих газов.

7. Работа на установке характеризуется следующими вредными и опасными факторами, воздействие которых на работников может привести к несчастному случаю:

- а) высокое напряжение;
- б) электромагнитное излучение;
- в) ультрафиолетовое излучение;
- г) световое излучение;
- д) воздействие вредных веществ (например, окислов азота, серы, углерода и т. п.)

Во избежание несчастных случаев каждый работник должен строго соблюдать требования правил, норм и инструкций.

Для создания безопасных условий труда предусмотрены следующие меры защиты:

7.1 Токоведущие части установки изолированы, в результате чего находятся в недоступных для работающих местах. «Поджиг» высокочастотного электрического разряда в установке, требующий прикосновения проводником к электроду, автоматизирован, что исключает случайное прикосновение персонала к электроду.

Металлические части установки, которые могут вследствие повреждения изоляции оказаться под напряжением, заземлены. Замер сопротивления контура заземления производится ежегодно.

7.2 Установка размещена в металлических корпусах, экранирующих электромагнитное и ультрафиолетовое излучение. запрещено во время работы установки, открывать двери генератора и технологического блока. При соблюдении указанных мер излучение не превышает допустимого.

7.3 Смотровое окно на дверях технологического блока установки должно быть оснащено экранирующей металлической сеткой.

7.4 Установка оснащена вытяжной системой вентиляции, системой «мокрой» очистки отходящих газов, защищающих работников от вредных газообразных и конденсированных веществ, образующихся в процессе работы.

8. Защитные ограждения (открывающиеся и съёмные) должны иметь электромеханические блокировки, автоматически отключающие подачу напряжения на установку при их открывании.

Запрещается работать на установке при неисправных дверных блокировках, открытых дверях генератора и технологического блока установки.

9. Крепление блокировочных устройств должно быть надёжным, исключающим случаи самооткрывания.

10. В случае прекращения подачи электроэнергии, во время перерыва в работе или в аварийной ситуации установка должна быть отключена от питающей сети.

11. Периодические осмотры и планово-предупредительные ремонты генератора, производятся по графикам, утверждённым руководителем работ.

12. Все работники обеспечиваются спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты.

13. Запрещено принимать пищу на рабочем месте.

14. В случае травмирования работников необходимо оказать доврачебную помощь, если необходимо, вызвать скорую помощь по телефону **03**, сообщить руководителю работ.

4.4 Электробезопасность

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с ЭВМ и другими электрическими установками в условиях повышенной

влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного прикосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования. Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами. Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;
- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надёжной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей).

4.5 Пожарная и взрывная безопасность

По взрывопожарной и пожарной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В1-В4, Г и Д, а здания – на категории А, Б, В, Г и Д. Помещение лаборатории относится к категории В.

Причинами возгорания могут служить:

- неисправность токоведущих частей установок;
- работа с открытой электроаппаратурой;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- Сообщить руководству (дежурному).
- Позвонить в соответствующую аварийную службу или МЧС – тел. 112.
- Принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Установлено увеличение тока, протекающего в разряде при его запылении веществами с потенциалом ионизации менее 7 эВ;
2. Показано отсутствие изменения характеристик электромагнитного поля разряда при степенях его запыления $\nu < 10^{-2}$;
3. Установлено уменьшение затухания электромагнитного поля ВЧФР при его запылении проводящим материалом.
4. Результаты работы могут быть использованы при проектировании и эксплуатации установок по плазменной переработке веществ, а также установок для плазменного нанесения покрытий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Зилитинкевич С.И. Электрическое факельное истечение // Телеграфия и телефония без проводов, 1928, № 9.
2. Trunecek V. Unipolar high - frequency discharge // Folia Fac. Sci. Nat. University. 1971.
3. Trunecek V. Unipolar and electrodeless capacitively coupled high - frequency discharges excited at atmospheric pressure and their applications // Acta physica slovac, 1979.
4. Trunecek V. Fackelentladung und Fackelbogen // Beitrage a us der Plasmaphysic. - 1962, Vol. 1, № 2.
5. Кузовников А.А., Канцов Н.А. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика, 1960.
6. Кузовников А.А., Цянь-Гао-Юнь. Исследование высокочастотного разряда в диапазоне от 1,5 до 15 МГц // Изв. Вузов. Физика, 1960.
7. El Gamal M. // Contr. Pap. of 8 Int. Conf. in Ijniz. Gases, Vienna. - 1967.
8. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическое описание высокочастотного факельного разряда // Физика газоразрядной плазмы. - М., 1968.
9. Ткаченко А.Г., Корючкин А.В., Луценко Ю.Ю., Гамзинов С.В. Теплоэлектрофизические параметры секционированного высокочастотного факельного плазмотрона // Плазменная техника, технология, Казань, 1988.
10. Тихомиров И.А. Высокочастотные факельные плазмотроны и их практическое применение // Известия СО АН СССР, Серия техн. наук, 1980, -№8, вып.2.

- 11.Ткаченко А.Г. Исследование теплофизических и газодинамических характеристик плазменной струи высокочастотного факельного разряда // Неравновесные процессы в разряженных средах. Новосибирск. - 1983.
- 12.Прокофьев А.М. Влияние постороннего постоянного электрического поля на факельное истечение // ЖЭТФ. - 1937.
- 13.Farsky, J.Janca. Mutual relation among macro and microparameters in unipolar h.f.discharges // Scripta.Fac.Sci.UJ.E.P -1972. - Bd.2
- 14.Тихомиров И.А. и др. Исследование пространственного распределения параметров ВЧ факельного разряда. I. Газовая температура /Деп. в ВИНТИ. - 1973. - № 7606-73.
- 15.Тихомиров И.А., Марусин В.В. К распределению электронов по энергиям в ВЧ факельном разряде // ЖТФ. - 1967. - т.38. - №1.
- 16.H. Hess, H.-G. Kloss, K. Rademacher, K. Seliger, Vergleich zwischen einem Verfahren zur Bestimmung von Bogentemperaturen mit Hilfe von Stoßwellen und einer spektroskopischen Methode, Beiträge aus der Plasmaphysik, 2 (1962) 171-178
- 17.Тихомиров И. А. Квеско С.Б. Плазма амплитудно- модулированного высокочастотного факельного разряда и перспективы ее использования // Физика и химия обработки материалов, 1984. №6.
- 18.U. Jecht, W. Kessler О механизме возбуждения факельного разряда на частоте 2400 МГц // Z.Phys. - 1964. - 178. - №2.
- 19.Марусин В.В., Тихомиров И. А. Получение амплитудно- модулированной плазмы // Генераторы низкотемпературной плазмы. М.: - 1969.
- 20.Сорокин Л.М. ВЧ плазмотроны // В кн. Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. - Новосибирск, Наука, 1977,-с. 311
- 21.Луценко Ю.Ю., Тихомиров И.А. О характере отражения электромагнитной волны в канале ВЧ факельного разряда//Тез. докл. Все-союзн. семинара по высокочастотному пробою газов. – Тарту, 1989.
- 22.Сузи Я.А., Лаан М.Р. Измерение вращательной температуры во время импульсного ВЧ разряда // Уч. Зап. Тартуского ун-та, 1982.

23. Луценко Ю.Ю., Власов В.А., Зеленецкая Е.П. Влияние осевой неоднородности плазмы высокочастотного факельного разряда на его электродинамические характеристики // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. - №.1. – с.117 – 122.
24. Луценко Ю. Ю. Особенности процесса горения высокочастотного емкостного разряда в средах с дисперсной фазой / Ю. Ю. Луценко, В. А. Власов, Ю. В. Вендеревская // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. – 2007. – Т. 311, №2: Математика и механика. Физика. – [С. 80-82].
25. <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/29273>
26. Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. Справочник под ред. В.Н. Кондратьева. – М.: Наука, 1974. – 350 с.
27. Качанов А.В., Трехов Е.С., Фетисов Е.П. Электродинамическая модель высокочастотного факельного разряда // Журнал технической физики. – 1970. – Т. 40. – № 2. – С. 340–345.
28. Нетушил А.В., Жуховицкий Б.Я., Кудин В.Н., Парини Е.П. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников. – М._Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 480 с.